

文章编号:1000-1441(2009)05-0483-05

叠前弹性参数反演方法及其应用

王维红¹, 林春华¹, 王建民¹, 刘淑芬²

(1. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712; 2. 大庆石油学院地球科学学院, 黑龙江大庆 163318)

摘要:叠前时间偏移和 AVO 反演相结合的叠前弹性参数反演技术为岩性和隐蔽性油气藏勘探提供了较为有效的储层识别方法。依据弹性波传播的基本理论和平面纵波入射的反射和透射 Zoeppritz 方程, 给出了计算弹性参数的公式。算法实现的基本原理是: 首先将叠前时间偏移的共反射点(CRP)道集转化为角道集; 然后基于角道集应用最小平方方法进行优化求解, 得到各弹性参数剖面; 最后通过计算结果建立地质模型, 并进行反演, 进而进行储层描述和含油性预测。利用理论模型对叠前弹性参数反演方法进行了验证, 结果显示方法的计算误差较小。将方法应用于复杂陆相断陷盆地地震资料反演, 并与商业软件的反演结果进行了对比分析, 结果表明, 叠前弹性参数反演方法的分辨率较高, 钻井资料证实其储层预测精度也较高。

关键词:Zoeppritz 方程; 弹性参数; 角度道集; 陆相断陷盆地; 叠前反演

DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2009.05.010

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

岩性和隐蔽性油气藏是当今油气勘探的主要目标^[1], 储层预测则是岩性油气藏勘探中的关键环节之一。近年来, 以地震反演为核心的储层预测技术有了很大的发展。如作为烃类、岩性和裂隙重要检测手段的 AVO 反演方法^[2,3]、纵波和转换波 AVO 联合反演技术^[4]和基于数理统计学的 AVO 波形反演方法^[5]等。在海洋天然气水合物和海洋油气勘探中, AVO 反演也是一种重要的烃类识别方法^[6]。随着勘探目标复杂性的增加和计算机技术的进步, 叠前偏移技术得到了重视, 在解决复杂构造成像问题中发挥了重要作用。现今, 结合叠前时间偏移和 AVO 技术的叠前弹性参数反演方法已成为油气勘探方法研究中的热点^[7,8]。

Connolly^[8]将波阻抗的概念推广到非零入射角, 此时波阻抗对应的物理量称之为弹性阻抗, 并以弹性阻抗为基础, 解决了北海地区的储层描述问题。甘利灯等^[9]对弹性阻抗在岩性和流体预测中的潜力进行了分析, 并给出了理论和实际地震数据的算例, 认为通过优选特定入射角的弹性阻抗可以更好地识别岩性和流体。但是, 上述作者只对弹性阻抗进行了研究, 实际上弹性参数很多。Zoeppritz 方程为弹性参数反演提供了理论基础, 但该方程包含了界面两侧地层的太多信息, 无法求解实际数据。为此, 很多学者都对该方程进行了近似研究, 其中最著名的是 Shuey 公式^[10]; 很多学者对 Zoeppritz 方程近似式的精度进行了研究^[11~13]; Tarantola^[14]还应用非线性反演策略对弹性反演进行计算, 非线性

反演的提出丰富了弹性反演的研究。

我们提出基于叠前 CRP 道集利用射线追踪法提取角道集, 然后根据实际情况选择合适的 Zoeppritz 方程近似式对角度道集进行反演的方法, 理论和实际地震数据的计算结果显示, 叠前反演算法具有高精度和高效率的特点。

1 叠前弹性参数反演的基本原理

二维介质中平面入射波的反射和透射原理如图 1 所示, 介质 1 中的纵波和横波速度分别为 v_{P1} 和 v_{S1} , 密度为 ρ_1 ; 介质 2 的纵波和横波速度分别为

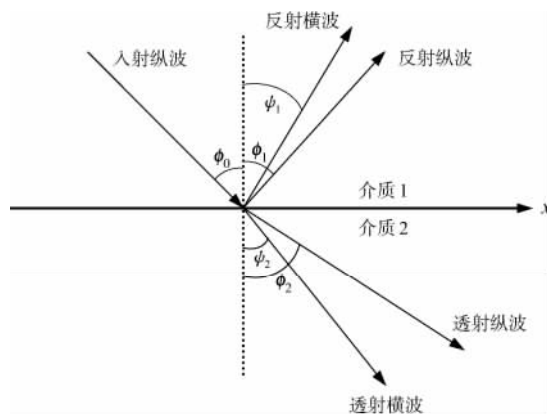


图 1 二维介质中平面入射波的反射和透射原理

收稿日期:2008-10-18; 改回日期:2009-04-02。

作者简介:王维红(1975—),男,工程师,主要研究方向为地震资料数字处理和储层反演方法。

基金项目:国家重点基础研究(973)项目(2009CB219307)资助。

v_{P2} 和 v_{S2} , 密度为 ρ_2 ; ϕ_0 为纵波入射角, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为纵波反射角和透射角, ψ_1 和 ψ_2 分别为横波反射角和透射角。

$$\begin{bmatrix} \cos \phi_1 & \frac{v_{P1}}{v_{S1}} \sin \phi_1 & \frac{v_{P1}}{v_{P2}} \cos \phi_2 & -\frac{v_{P1}}{v_{S2}} \sin \phi_2 \\ -\sin \phi_1 & \frac{v_{P1}}{v_{S1}} \cos \phi_1 & \frac{v_{P1}}{v_{P2}} \sin \phi_2 & \frac{v_{P1}}{v_{S1}} \cos \phi_2 \\ -\cos 2\phi_1 & -\sin 2\phi_1 & \frac{\rho_2}{\rho_1} \cos 2\phi_2 & -\frac{\rho_2}{\rho_1} \sin 2\phi_2 \\ \sin 2\phi_1 & -\frac{v_{P1}^2}{v_{S1}^2} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{v_{S2}^2}{v_{S1}^2} \frac{v_{P1}^2}{v_{P2}^2} \sin 2\phi_2 & \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{v_{P1}^2}{v_{S1}^2} \cos 2\phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 \\ \sin \phi_1 \\ \cos 2\phi_1 \\ \sin 2\phi_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_{PP} 和 R_{PS} 分别为以位移振幅表示的反射纵波和反射横波的反射系数; T_{PP} 和 T_{PS} 分别为以位移振幅表示的透射纵波和透射横波的透射系数。(1)式给出了由反射角和透射角函数表示的平面波反射系数和透射系数与弹性参数之间的关系。

目前大多数地震资料都是纵波震源, 勘探地震学中感兴趣的主要是随入射角变化的反射波(PP波)。很多学者研究了 Zoeppritz 方程的近似形式, 近似条件是假设界面两边岩石的弹性参数变化很小, 且传播角度在临界角范围内。Aki 和 Richards^[15]给出了入射角为 θ 时的 Zoeppritz 方程的简化形式, 即

$$R_{PP}(\theta) = \left[\frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta) \right] \frac{\Delta v_P}{v_P} - \left[4 \frac{v_S^2}{v_P^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta v_S}{v_S} + \left[\frac{1}{2} (1 - 4 \frac{v_S^2}{v_P^2} \sin^2 \theta) \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2)$$

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 \quad \rho = \frac{\rho_2 + \rho_1}{2}$$

$$\Delta v_P = v_{P2} - v_{P1} \quad v_P = \frac{v_{P2} + v_{P1}}{2}$$

$$\Delta v_S = v_{S2} - v_{S1} \quad v_S = \frac{v_{S2} + v_{S1}}{2}$$

(2)式中的待求解参数有 3 个: $\Delta v_P/v_P$ 反映纵波穿过地层界面时的相对变化; $\Delta v_S/v_S$ 反映横波穿过地层界面时的相对变化; $\Delta \rho/\rho$ 反映介质密度在地层界面的相对变化。基于不同入射角的地震资料, 利用 Aki-Richards 近似方程, 通过反演可以求取上述各弹性参数。

为更直观地表示波阻抗和地层反射系数的关系, Fatti 等给出如下形式的 Zoeppritz 方程近似式^[2]:

$$R_{PP}(\theta) = \left[\frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta) \right] \frac{\Delta I_P}{I_P} - \left[4 \frac{v_S^2}{v_P^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta I_S}{I_S} - \left[\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \frac{v_S^2}{v_P^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3)$$

基于图 1, 根据界面上位移连续和应力连续性质以及 Snell 定律, 可得到如下由矩阵形式表示的 Zoeppritz 方程:

$$\Delta I_P = I_{P1} - I_{P2} \quad I_P = \frac{I_{P1} + I_{P2}}{2}$$

$$\Delta I_S = I_{S1} - I_{S2} \quad I_S = \frac{I_{S1} + I_{S2}}{2}$$

式中: $I_P = v_P \rho$ 和 $I_S = v_S \rho$ 分别为纵波和横波阻抗; 其它参数的意义与(2)式相同。在临界角范围内, (3)式可适用于入射角 $\theta < 50^\circ$ 的情况。在进行反演计算时, 我们采用的是近似公式(3)。

2 理论模型试算

(3)式中角度 θ 的取值采用等间隔方式, 如 $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, \dots$ 。令未知参数矩阵为

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3]^T$$

$$x_1 = \frac{\Delta I_P}{I_P} \quad x_2 = \frac{\Delta I_S}{I_S} \quad x_3 = \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

假定 $v_P = 2v_S$, 则(3)式可写成如下的超定方程形式:

$$\mathbf{H}_{m \times n} \mathbf{X}_n = \mathbf{R}_m \quad m > 3 \quad n = 3 \quad (4)$$

m 取决于角度采样间隔和最大入射角。有

$$\mathbf{R}_m = [R(\theta_1), R(\theta_2), R(\theta_3), \dots, R(\theta_m)]^T$$

$$\mathbf{H}_{m \times n} = \begin{bmatrix} 1 + \tan^2 \theta_1 & -2 \sin^2 \theta_1 & \sin^2 \theta_1 & -\tan^2 \theta_1 \\ 1 + \tan^2 \theta_2 & -2 \sin^2 \theta_2 & \sin^2 \theta_2 & -\tan^2 \theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 + \tan^2 \theta_m & -2 \sin^2 \theta_m & \sin^2 \theta_m & -\tan^2 \theta_m \end{bmatrix}$$

反演计算时, 求解如下形式的最小平方方程:

$$(\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{X} = \mathbf{H}^T \mathbf{R} \quad (5)$$

式中: \mathbf{H}^T 为矩阵 \mathbf{H} 的转置矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; λ 为稳定因子。对于理论模型, 根据初始 \mathbf{X} 值以及起始地层的波阻抗和密度值, 可依次反演得到所有地层的阻抗和密度。

设计两层介质理论模型,界面位于深度为 2 400 m 处,界面之上介质(介质 1)的各弹性参数分别为 $v_{p1} = 3\ 600\text{ m/s}$, $v_{s1} = 2\ 200\text{ m/s}$, $\rho_1 = 2.26\text{ g/cm}^3$;界面之下介质(介质 2)的各弹性参数分别为 $v_{p2} = 4\ 000\text{ m/s}$, $v_{s2} = 2\ 500\text{ m/s}$, $\rho_2 = 2.37\text{ g/cm}^3$ 。利用(5)式对理论模型进行计算,得到如表 1 所示的介质 2 的波阻抗和密度反演结果。反演计算时,角度间隔取 10° ,计算范围为 $0\sim 40^\circ$,稳定因子 $\lambda=0.5\%$ 。此方法即为最优化广义线性 AVA 反演方法。反演的纵波和横波阻抗误差分别为 1.26%和 2.87%,小于 3%,密度误差由于受最大入射角的影响略大了一些,为 3.37%,但在工业生产允许的 5%范围以内。结果表明本文给出的弹性参数反演方法可以应用于实际地震资料处理。

表 1 理论模型弹性参数反演结果

	$I_P/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$I_S/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
介质 1	8 136	4 972	2.260 0
介质 2	9 480	5 925	2.370 0
介质 2 反演值	9 360	6 090	2.450 7

3 实际应用

大庆油田某陆相断陷盆地地质条件复杂,岩性油气藏和隐蔽油气藏是主要勘探目标,我们将叠前参数反演方法应用于该盆地实际资料的反演。

叠前弹性参数反演的实现步骤为:

- 1) 对原始地震资料进行预处理和叠前时间偏移,得到共反射点(CRP)道集;
- 2) 利用拾取的叠加速度和射线追踪算法获得角道集;
- 3) 基于角道集,针对研究区敏感弹性参数,选取合适的 Zoeppritz 近似方程,进行叠前弹性参数反演(在本文中,反演结果是拟纵波剖面 and 拟横波剖面);
- 4) 根据反演结果建立合适的地质模型,采用商业软件进行波阻抗反演。

此外,通过叠前弹性参数反演还可以得到横波阻抗、密度、泊松比和拉梅系数等弹性参数。

图 2 为大庆油田某区块过 19-68 井和 19-69 井主测线的叠前时间偏移剖面,地震资料揭示该区断陷期地层较厚,烃源岩发育。

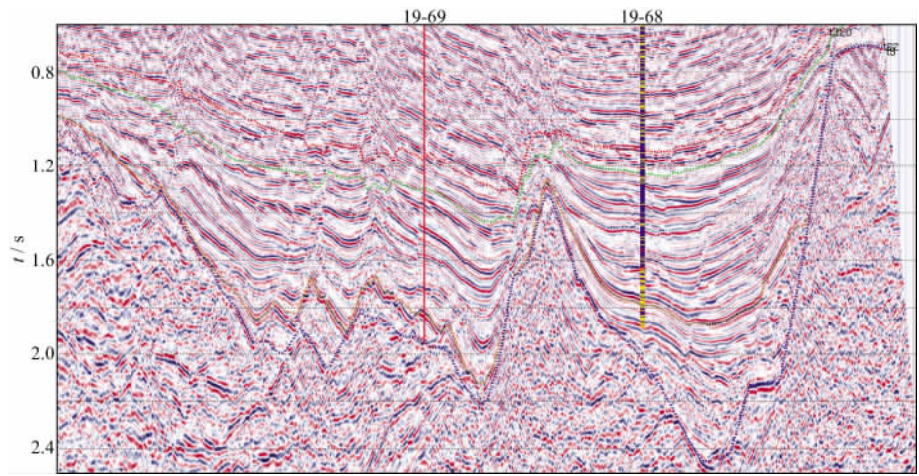


图 2 大庆油田某区块过 19-68 井和 19-69 井主测线的叠前时间偏移剖面

采用叠前弹性参数反演对该主测线的地震数据进行了波阻抗反演。图 3a 为经过叠前时间偏移后的 CRP 道集,图 3b 为射线追踪法得到的角道集,由图可见,角道集的信噪比高于 CRP 道集,且能很好地压制相干噪声。采用的射线追踪方程为

$$\sin^2\theta = \frac{x^2}{x^2 + (v_{rms}T_0)^2} \tag{6}$$

式中: x 为偏移距; θ 为入射角; T_0 为零偏移距双程旅行时; v_{rms} 为均方根速度。计算时取角度间隔为 4° 。

将待计算的主测线的 CRP 道集抽成角度道集

后,利用(5)式所表示 Fatti 近似式对角道集进行计算,得到拟纵波剖面(图 4a)和拟横波剖面(图 4b)。

反演结果有较高的分辨率和信噪比,基于反演结果进行波阻抗反演,可以获得品质较高的波阻抗剖面。利用拟纵波剖面建立地质模型,应用测井约束 Jason 反演方法,对拟纵波剖面进行了波阻抗反演,反演结果如图 5 所示(从蓝到红表示波阻抗增大)。由图 5 可见,反演结果很好地描述了 19-68 井的砂体,清楚地显示出产油层砂体的空间展布特征。此外还可以通过反演结果判定沉积物源方向。

对叠前时间偏移地震数据(图 2)和拟纵波剖

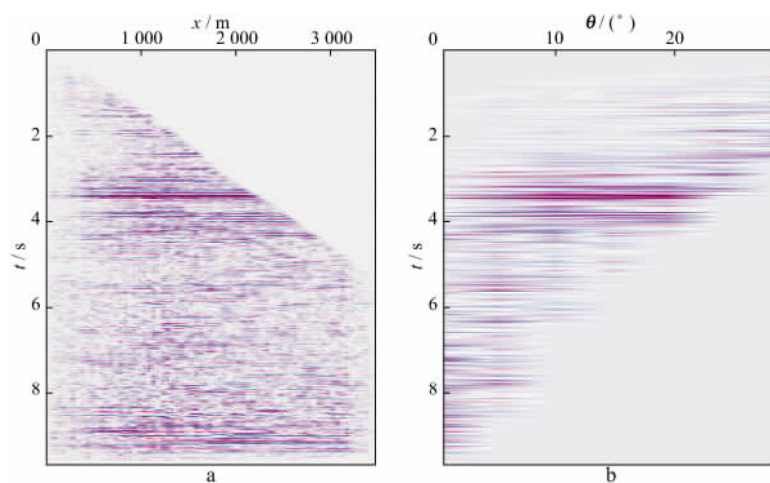


图 3 CRP 道集(a)和角道集(b)

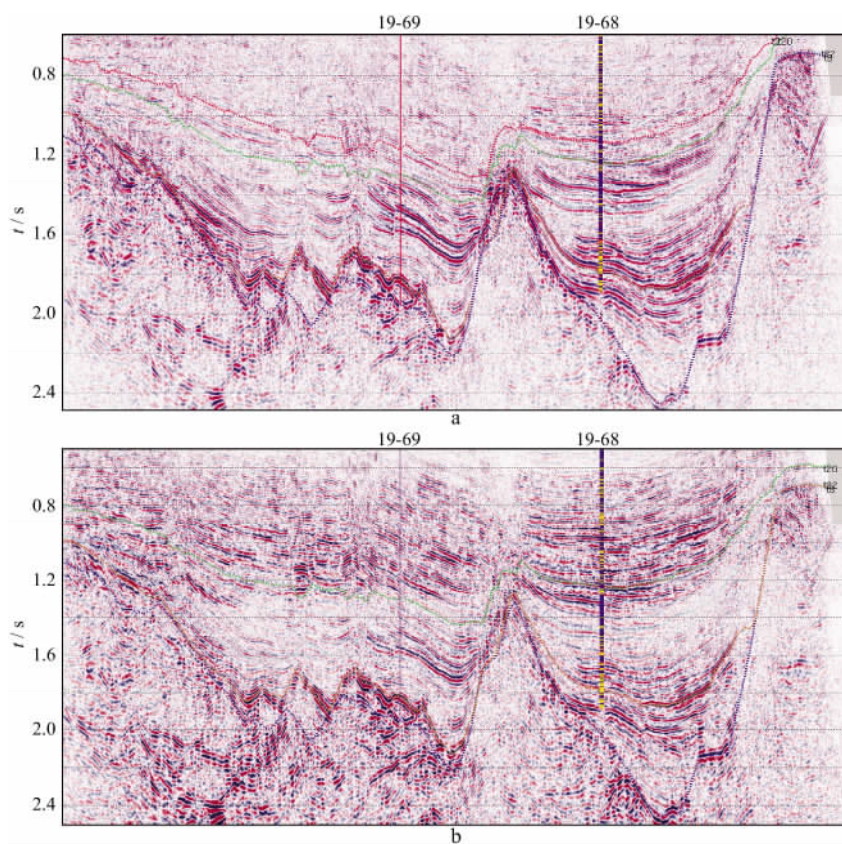


图 4 拟纵波剖面(a)和拟横波剖面(b)

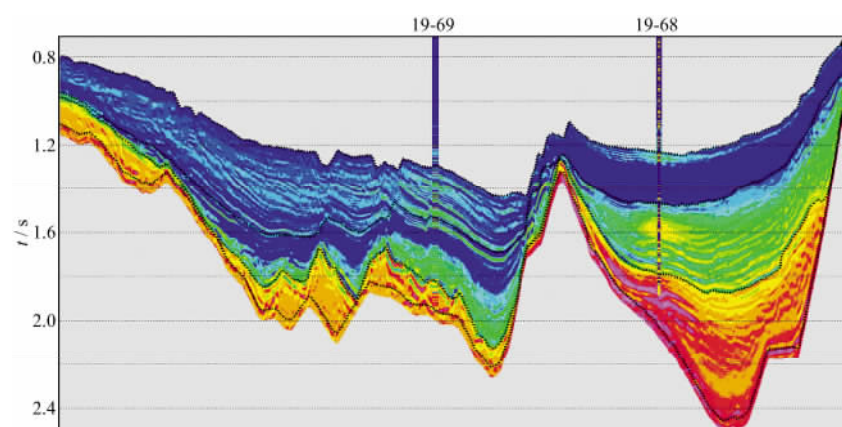


图 5 拟纵波剖面的波阻抗反演结果

面(图 4a)进行了频谱分析,分析时窗为 1 000~2 500 ms,包括所有勘探目的层。图 6 显示的是频谱分析结果(从蓝到红表示频谱减小),分析可知,

拟纵波地震剖面的频带较宽,范围为 2~68 Hz,主频为 30 Hz;叠前时间偏移剖面的频带范围为 8~55 Hz,主频为 24 Hz。

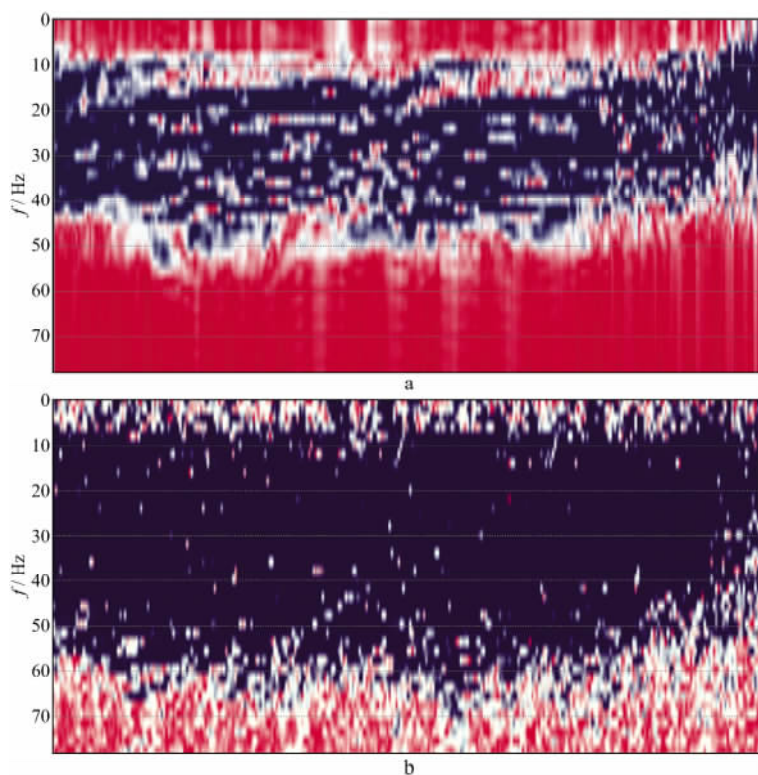


图 6 叠前时间偏移剖面(a)和拟纵波剖面(b)的频谱分析结果

4 结束语

1) 基于 CRP 道集的叠前弹性参数反演得到的拟纵波和拟横波剖面的分辨率要比常规处理方法和叠前偏移剖面的分辨率高;

2) 与常规反演相比,叠前弹性参数反演算法基于 CRP 道集计算 AVA 响应,这样能保证反射点不分散;

3) 角道集的信噪比要比 CRP 道集高,叠前弹性参数反演算法的计算误差较小;

4) 叠前弹性参数反演通过采用不同的 Zoeppritz 方程近似式,可求取不同的弹性参数,同时还应用了所有偏移距的地震数据,这是优于叠后波阻抗反演的重要因素之一;

5) 叠前弹性参数反演方法计算效率较高,能同时反演多个弹性参数,实用性强。

致谢:在本文编写过程中,得到大庆油田勘探开发研究院塔木察格勘探评价研究室的张革主任、龙江南副主任和陈显森高工的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 贾承造,赵文智,邹才能,等. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):3~9
- 2 Fatti J L, Vail P J, Smith G C, et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. Geophysics, 1994, 59(9): 1 362~1 376
- 3 Duffaut K, Landrø M. v_p/v_s ratio versus differential stress and rock consolidation—a comparison between rock models and time-lapse AVO data[J]. Geophysics, 2007, 72(5): 81~94
- 4 黄中玉,赵金州. 纵波和转换波 AVO 联合反演技术[J]. 石油物探,2004,43(4):319~322
- 5 陈建江,印兴耀. 基于贝叶斯理论的 AVO 三参数波形反演[J]. 地球物理学报,2007,50(4):1 251~1 260
- 6 彭苏萍,高云峰,杨瑞召,等. AVO 探测煤层瓦斯富集的理论探讨和初步实践——以淮南煤田为例[J]. 地球物理学报,2005,48(6):1 475~1 486
- 7 孟宪军,慎国强,王玉梅,等. 叠前 AVA 地震纵横波阻抗同步反演技术研究[J]. 石油物探,2004,43(增刊): 53~55
- 8 Connolly P. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999, 18(4): 438~452

(下转第 492 页)

(上接第 487 页)

- 9 甘利灯,赵邦六,杜文辉,等. 弹性阻抗在岩性和流体预测中的潜力分析[J]. 石油物探,2005,44 (5):504~508
- 10 Shuey R. A simplification of the Zoeppritz equations [J]. Geophysics,1985,50(4):609~614
- 11 Ursin B,Tjaland E. Information content of the elastic reflection matrix[J]. Expanded Abstracts of 62nd Annual SEG Mtg,1992,796~799
- 12 Debski W, Tarantola A. Information on elastic parameters obtained from the amplitudes of reflected waves [J]. Geophysics,1995,60(5):1 426~1 436
- 13 唐旭东,甘利灯,李凌高. 转换波反射系数近似公式及精度分析[J]. 石油物探,2008,47(2):150~155
- 14 Tarantola A. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data [J]. Geophysics, 1986, 51 (10):1 983~1 903
- 15 Aki K, Richards P G. Quantitative seismology [M]. New York, USA:W. H. Freeman and Company,1980. 1~50

(编辑:蔡 俩)